

SITUAZIONE ATTUALE DELLE COMUNICAZIONI OTTICHE

J.A. Martin Pereda

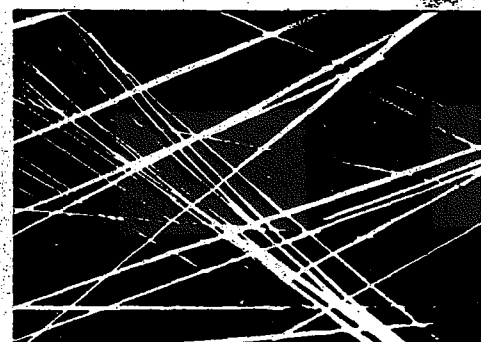
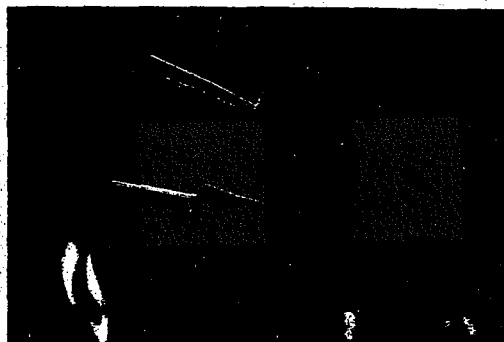
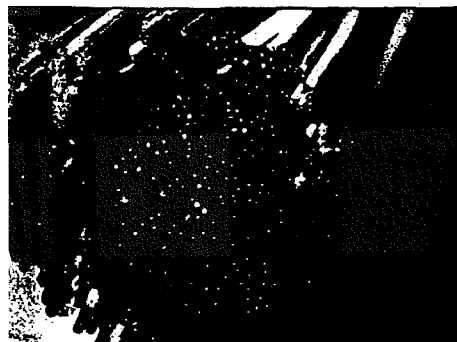
Parlare oggi delle comunicazioni ottiche (CO) e dire che possono avere un futuro promettente è come predire che l'uomo può arrivare sulla luna. Le CO sono già oggi una realtà tangibile e non si possono più considerare quella specie di curiosità da baraccone che sembrano essere le scoperte scientifiche o tecnologiche che ancora non siano state verificate nei laboratori di ricerca. Nessuno che sia al corrente dei risultati della tecnologia moderna può negare che la fibra ottica, ed i segnali luminosi che essa trasmette, appartengano completamente ad una realtà tanto attuale quanto quella del taglio di materiali con il laser o l'elaborazione delle immagini. Non fanno più parte del futuro: ormai sono il presente. Le fibre ottiche hanno lasciato i centri di ricerca per diventare oggetto di fabbricazione in serie. Chi le utilizza nel suo lavoro non può più definirsi un ricercatore: tutt'al più potrà dire di occuparsi del loro sviluppo.

In una panoramica non completa, viene presentata la situazione attuale di alcuni tra i temi più significativi per quanto riguarda le comunicazioni ottiche. L'analisi è centrata essenzialmente sulle fibre mono e multimodali, su quelle a caratteristiche speciali, usate nelle comunicazioni coerenti, sui componenti attivi e sulle reti locali.

Ma evidentemente rimane sempre qualcosa di nuovo da scoprire e da introdurre. Le esigenze soddisfatte generano solo, a lungo andare, nuove esigenze. Arrivare ad una meta significa semplicemente aver concluso una tappa; si intravedono subito nuove mete e la strada non finisce mai. Per le CO non andrà diversamente. Se si studia, senza entrare troppo nei dettagli, l'evoluzione delle CO da quando, nel 1966, ne furono presentati i concetti basilari fino ad oggi, si può vedere un susseguirsi di idee che si alternano senza che, di fatto, nessuna si imponesse realmente.

Fibre multimodali Fibre monomodali

Nonostante la prima proposta, presentata nel 1966, di un materiale dielettrico come mezzo atto alla trasmissione ottica introducesse già il concetto di fibra monomodale, i primi svi-



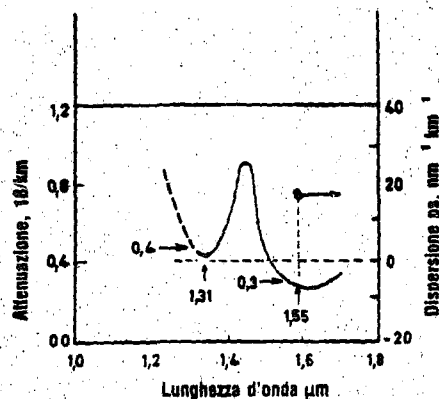


Fig. 1 - Attenuazione e dispersione tipiche di una fibra monomodale.

Fig. 2 - Schema dell'evoluzione della tecnologia delle fibre ottiche.

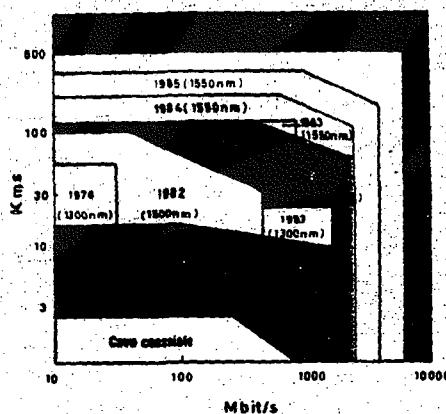


Fig. 3 - Sviluppo dei sistemi sperimentali a fibra ottica a partire dai primi modelli.

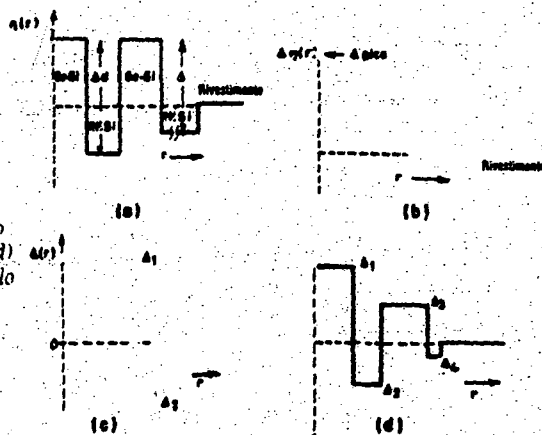


Fig. 4 - a) Struttura a nucleo segmentato; b) Struttura a nucleo segmentato per fibre a dispersione traslata; c) Struttura a profilo di indice a W o a doppio rivestimento per fibre a dispersione appiattita; d) Struttura a rivestimento quadruplo per fibre a dispersione appiattita.

luppi portati a termine prevedevano l'utilizzo di fibre multimodali. Verso il 1970 apparve la prima fibra a "bassa attenuazione", circa 20 dB/km, e un po' più tardi la tecnologia ad indice di rifrazione graduato. Gli studi effettuati negli anni '70 fecero sì che verso il 1980 nascesse il primo sistema a fibre ottiche, con il quale ebbe inizio un forte sviluppo delle fibre multimodali. Queste funzionavano generalmente con lunghezze d'onda dell'ordine di 850-900 nm con fotorivelatori realizzati con tecnologia al silicio, distanza tra i ripetitori di 5-10 km e velocità di trasmissione comprese nella fascia 6-140 Mbit/s in Europa, 6-90 Mbit/s negli Stati Uniti e 6-100 Mbit/s in Giappone. Iniziavano ad apparire i sistemi di moltiplicazione per divisione delle lunghezze d'onda (WDM). Gli sforzi di tutti i laboratori di ricerca si concentrarono sull'aumento della riproducibilità dell'attenuazione multimodale. L'obiettivo da raggiungere era l'ottenimento di una corrispondenza accettabile tra le misurazioni realizzate in laboratorio e quelle effettuate nella zona di applicazione.

Mentre le fibre multimodali offrivano, nonostante tutto, prospettive piuttosto allettanti, un primo problema sorse con le fibre ad indice graduato, in relazione alla stima della loro larghezza di banda in un collegamento articolato. A questo si unirono la necessità di ottenere un alto rendimento con fibre ad ampia larghezza di banda e la scoperta che quasi tutte le fibre presentavano un comportamento più vantaggioso per lunghezze d'onda di 1300 o 1500 nm. In tali zone la combinazione di una dispersione cromatica nulla o quasi e di un'attenuazione molto bassa, di 0,2-1 dB/km invece di 2-5 dB/km per le lunghezze d'onda di 850-900 nm, fece sì che, all'inizio degli anni '80, la situazione subisse una graduale trasformazione ed apparissero i sistemi monomodali della seconda generazione.

I primi risultati apparvero già determinanti. Così, in un esperimento effettuato nel 1980, vennero trasmessi dei dati a 140 Mbit/s ad una distanza di 49 km, senza la minima distorsione, mediante fibra monomodale, mentre i valori relativi alla fibra ad indice graduato erano fermi sull'1 ns/km. Poco dopo, lavorando già a 1300 nm, si ottennero velocità di 100-600 Mbit/s con distanze tra i ripetitori superiori ai 25 km, mentre con le fibre ad indice graduato si arrivava a soli 10 km con velocità di 100 Mbit/s.

L'attenuazione e la dispersione di una

fibra monomodale standard sono indicate nella figura 1. I valori illustrati sono chiaramente significativi. Se si tiene presente che l'ampiezza di riga di un laser tipico è di 5 nm, si deduce che, per esempio, a 1300 nm la dispersione è inferiore ai 4 ps/nm per chilometro, quindi per un collegamento di 50 km si avrebbe una dispersione di meno di 1 ns. Ma la figura 1 mostra qualcosa di più. Con lunghezze d'onda di 1500 nm l'attenuazione è ancora minore, dell'ordine degli 0,2 dB/km; questo fatto risulta altamente vantaggioso al momento di installare i ripetitori. A questo punto, però, la dispersione aumenta fino a 20 ps/nm per chilometro. Si deve quindi affrontare un piccolo dilemma: diminuire l'attenuazione a spese della dispersione o viceversa. Come vedremo più avanti,

la soluzione ideale consisterebbe nell'abbassare sia l'attenuazione che la dispersione. A questo si arriverà con le fibre speciali illustrate nelle pagine seguenti.

La figura 2 riassume quanto si è detto finora. Come si può vedere, il 1984 presenta chiaramente un punto di discontinuità. Fino a quell'anno i sistemi multimodali erano quelli dominanti; da allora, però, quasi nessuno ne parla più, perché i sistemi monomodali sono ora gli unici operativi. Per quanto riguarda la loro applicazione concreta nei sistemi, soprattutto sperimentali, a partire dalle prime prove agli inizi degli anni 70, la sintesi è illustrata nella figura 3, che comprende anche i sistemi coassiali preesistenti ed i limiti teorici, sia per le fibre ottiche che per l'elettronica. I progres-

si sono stati enormi e spettacolari e, soprattutto, mostrano l'impatto prodotto dall'apparizione delle fibre da 1300 nm, seguite dalle monomodali e, infine, da quelle da 1500 nm. Un altro fatto significativo è che la velocità di trasmissione ha avuto un'evoluzione molto più lenta di quella inerente alla distanza tra i ripetitori. Mentre la prima veniva moltiplicata secondo un fattore di due a cinque, l'altra raddoppiava. Di fatto, per molti anni non c'è stato un incremento significativo nelle velocità di trasmissione fino al recente aumento a 4 Gbit/s ottenuto dalla AT&T nel 1985. Infine occorre segnalare il limite elettronico che appare a destra e che non sembra poter superare facilmente i 2 Gbit/s; tale limite rimane molto al di sotto di quello teorico dei componenti ottici che en-

Fibre monomodali

Società	Margine di trasmissione (nm)	Attenuazione (dB/km)	Dispersione nulla	Dispersione massima e margine (ps/km)	Lunghezza massima del cavo (km)
AT&T	1310-1550	0,4/0,35	1310±10	3,2 (1285-1300) 17 (1550)	—
Cabloptic	1275-1325	0,5	1315	4	4,5
Corning-Glass Works	1300 1550	0,4-0,22	1300 1550	3,5 (1285-1330) 2,5 (1525-1575)	12,6 12,6
Furukawa Elec. America Inc.	1285-1330	0,4	130±20	3,5 (1285-1330)	10,0
Gec Optical Fibre. Ltd. London	1300	0,4-1,1	1305	6 (1275-1325)	12
ITT Electro-Optical	1300	0,5-1	1310	3,5 (1285-1330)	5
Pirelli Cable Corp.	1300	0,4-1	—	3,5 (1285-1330)	6,4
Standard Wires & Cable Co.	1300-1550	0,5	1300	3,5 (1285-1330)	6

Fibre multimodali

AT&T	825-1300	3,50-1,20	—	300-1100 (825) 300-1100 (1300)	—
Cabloptic S.A.	1200-1600	0,8	—	—	4,5
Corning Glass Works	850-1300	3,2	—	—	2,2
Diaguide Inc.	850	3	—	—	10
Furukawa	1285-1330	0,7-1,0	—	—	10

Tabella 1 - Situazione attuale delle fibre rese attualmente disponibili dai costruttori più importanti.

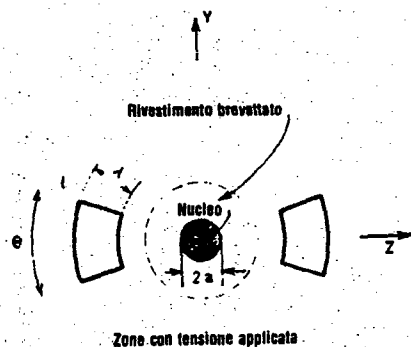


Fig. 5 - Schema di una fibra di tipo PANDA. Valori tipici: $2a = 4 \text{ m}$; $t/a = 56$; $\theta = 90^\circ$.

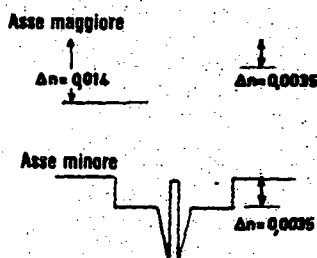


Fig. 6 - Profilo dell'indice di rifrazione secondo gli assi maggiore e minore del rivestimento.

Fig. 7 - Caratteristiche relative ai diversi emettitori.

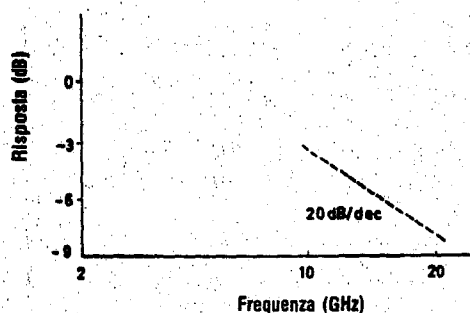
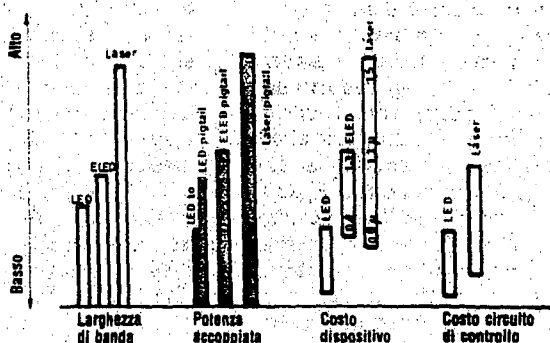


Fig. 8 - Risposta di un diodo a struttura eterogenea.

trano in gioco. La possibile introduzione, in un futuro non molto lontano, di componenti attivi totalmente ottici può rappresentare un'ulteriore evoluzione che oltrepasserà l'attuale barriera.

Anche la situazione commerciale è molto significativa. In questo momento fornire un elenco completo di tutti i costruttori di fibre monomodali e multimodali sarebbe piuttosto difficile a causa dell'elevato numero. C'è però un fatto caratteristico: a malapena si può trovare qualche costruttore europeo; la maggior parte sono americani o giapponesi.

Alcuni dei dati più importanti sulla produzione appaiono nella Tabella 1. Essa indica il valore della lunghezza d'onda limite della trasmissione, della sua attenuazione, della lunghezza d'onda con dispersione nulla, della massima dispersione nel margine d'uso e, infine, la lunghezza massima delle pezzature in vendita. Come si può notare, nella fibra monomodale si arriva a 12,6 km, mentre nella multimodale solo la Furukawa raggiunge i 10 km.

Altre fibre

Come si è detto nel paragrafo precedente, uno degli obiettivi che vengono evidenziati nella figura 1 è quello di ottenere, alla stessa lunghezza d'onda, la minima attenuazione e la minima dispersione. Si è iniziato ad avvicinarsi al raggiungimento di questo obiettivo con l'apparizione di nuovi tipi di fibre ottiche che sfruttano uno spostamento della curva di dispersione verso una regione in cui la minima attenuazione e la minima dispersione coincidano, oppure rendendo tale curva il più possibile orizzontale e di valore quasi nullo nei pressi del valore minimo di attenuazione. Si tratta delle fibre a dispersione traslata ("dispersion-shifted fibers") e di quelle a dispersione appiattita ("dispersion-flattened fibers"). Nelle prime la zona d'esercizio alla quale si tende è quella degli $1,55 \mu\text{m}$, mentre nelle seconde si cerca di ottenere una dispersione molto contenuta, entro la fascia da $1,3$ a $1,55 \mu\text{m}$.

La struttura dei due tipi di fibre è piuttosto diversa, dato che sono diversi anche i concetti sui quali si basano. In quelle a dispersione traslata l'effetto è ottenuto facendo in modo che la somma delle dispersioni dovute al materiale e dovute alla guida sia nulla. In quelle a dispersione appiattita-

	LED di superficie	LED di bordo	Laser
- Potenza fornita alle fibre monomodali	- 30	- 10	- 5
- Velocità (Mbit/s)	200	1000	10000
- Raffreddamento	aletta	aletta	aletta
- Costo del trasmettitore	basso	medio	medio
- Affidabilità	alta	media	media
- Margine (km)	1	20	20
- Margine di temperatura °C	-40++ 70°C	-40++ 70°C	-40++ 70°C

Tabella 2 - Comportamento dei diversi emettitori di luce.

ta la dispersione della guida viene adattata in modo da appianarla il più possibile. In entrambi i casi si combinano gli strati, multipli, del nucleo e/o del rivestimento, i loro indici di rifrazione e la separazione fra gli strati. Le tendenze principali sono le seguenti:

- strutture a nuclei segmentati (per entrambi i tipi);
- nuclei ad indice di rifrazione graduato con profilo triangolare (per il primo tipo);
- profili a W o a doppio rivestimento (per entrambi i tipi);
- rivestimento quadruplo (per il secondo tipo).

Queste strutture sono molto flessibili e possono adattarsi alle più svariate necessità. In generale, quasi tutte hanno l'obiettivo comune di presentare dimensioni ragionevoli, in modo da minimizzare le perdite nelle connessioni, diminuire le perdite dovute alle microcurvature e spostare la lunghezza d'onda di taglio monomodale nell'intorno del punto in cui si ha dispersione nulla. Alcuni esempi di questo tipo appaiono nella figura 4.

Oltre a queste fibre, e senza arrivare a quelle che lavorano nell'infrarosso, un altro gruppo ha fatto la sua comparsa recentemente. Sono le fibre il cui scopo è quello di essere utilizzate in sistemi di comunicazione coerenti e con una famiglia di sensori in cui lo stato di polarizzazione della luce sia essenziale. Finora non si è trovata una fibra che sia a polarizzazione unica; per questo il solo modo di affrontare il problema è quello di identificare i diversi meccanismi che danno luogo a birifrangenza e favorirli. Normalmen-

te si utilizzano tensioni meccaniche che possono essere originate, esternamente o internamente, mediante l'aggiunta di regioni fortemente drogate vicino al nucleo. Le prime sono state ottenute per mezzo di un nucleo circolare di silicio circondato da un rivestimento a sezione ellittica di borosilicato e con sezione molto inferiore a quella totale della fibra. In seguito sono stati sviluppati altri tipi di geometrie quasi piane o con regioni di tensione isolate come, per esempio, i tipi PANDA ("polarization-maintaining and absorption-reducing") della figura 5.

Di fatto sono due i tipi di fibre legati alla polarizzazione. Il tipo precedente costituisce il gruppo delle fibre in grado di mantenere la polarizzazione ("polarization-maintaining fibers"). Nel loro interno la propagazione avviene in due direzioni di polarizzazione ortogonale con accoppiamento minimo. L'altro gruppo consente soltanto la trasmissione in un'unica direzione di polarizzazione. Questo nuovo tipo è denominato "a polarizzazione unica": le fibre sono costituite da una struttura che presenta gli indici di rifrazione raffigurati nella figura 6, secondo gli assi x e y, che coincidono rispettivamente con l'asse maggiore e l'asse minore dell'ellisse che riveste il nucleo circolare.

Come si può comprendere, sono molti i problemi inerenti alle fibre finora presentate, ed alcuni di essi non sono ancora stati completamente risolti, come per esempio quello della fabbricazione o quello della teoria che governa la propagazione del raggio nelle strut-

ture più complesse. Il problema più importante, comunque, rimane quello di ottenere una fibra che sia realmente capace di mantenere la polarizzazione al 100%.

Componenti attivi

Come si è detto la comparsa di nuovi tipi di fibre ottiche ed i requisiti, molti più spinti, essenziali ai nuovi sistemi hanno portato alla realizzazione di componenti attivi che pochissimi anni fa non erano neanche in fase di collaudando sperimentale. La preferenza delle fibre monomodali rispetto alle fibre multimodali ha relegato queste ultime quasi unicamente a collegamenti a velocità molto bassa e a brevissima distanza. Anche l'uso dei LED si è ridotto a livelli quasi impensabili. D'altra parte le loro prestazioni, comprese quelle dei LED progettati appositamente per le fibre monomodali, sono talmente inferiori a quelle dei diodi laser (DL) che sarà difficile, in futuro, vederli riguadagnare la propria posizione. Nella Tabella 2 appaiono le caratteristiche dei due tipi di LED in uso e quelle dei DL. Come si può osservare, tranne per quel che riguarda l'affidabilità, il DL risulta generalmente superiore; un aspetto che, fino a non molto tempo fa, dava la predominanza ai LED, quello del limite di temperatura, è ormai fuori questione.

Un altro problema che si rende evidente è quello già citato della dispersione cromatica o del materiale. Un modo alternativo per risolverlo, senza ricorrere alle fibre speciali, è di utilizzare dei laser che emettono una frequenza unica, senza gli scarti che si hanno solitamente con le fibre normali. Lo sviluppo dei laser a risonanza distribuita (DFB) e quello di C3 stanno contribuendo notevolmente a risolvere questo problema. Tali laser, benché tuttora in fase di studio, probabilmente appariranno molto presto sul mercato. La concorrenza tra laser monofrequenza e fibre a dispersione traslata sta muovendo i primi passi. Nei laser monofrequenza, i risultati ottenuti più recentemente danno come spettro di emissione una riga dell'ordine di 10 MHz. Questo valore può essere utile per risolvere il problema della dispersione cromatica ma, evidentemente, non è sufficiente per le comunicazioni coerenti.

La figura 7 illustra un confronto generale fra tutti i parametri finora citati. Sono riportati la larghezza di banda,

- Comportamento entro i limiti

Ritardi non rilevabili 10-10/miglia
BER

Trasmissione a larga banda

- Guasto di segnalazione

"Handshaking" minimo.
(ACK e NACK eliminati)

- Controllo di flusso dati

Non applicabile per i circuiti virtuali
Controllo dell'origine applicato per
dati disturbati

- Hardware/Software

Intelligenza di supervisione in ogni
nodo

- Comportamento a pieno carico

Risposta uniforme in qualunque
condizione di carico

Tabella 3 - Caratteristiche di una rete a fibre ottiche.

Topologia della rete	TX ottico	RX ottico	Connettori	Accoppiatori a stella	Accoppiatori direzionali	Commutatori bypass
Anello	X	X	X		X	X
Stella	X	X	X	X		
Bus in linea	X	X	X		X	X

Tabella 4 - Riassunto dei componenti ottici per le topologie LAN.

la potenza associata alla fibra, il costo dell'emettitore e dei circuiti di collegamento per i tre tipi più comuni di emettitori, vale a dire LED, ELED (LED che emettono dal bordo, invece che attraverso la superficie come quelli normali) e diodi laser. Nel caso dell'accoppiamento della luce alla fibra ottica appaiono i casi più estesi: quelli in cui il dispositivo viene montato in un contenitore convenzionale del tipo TO e in cui una piccola fibra appare già unita al laser (tipo "pig-tail").

Rimane ancora qualcosa da dire sulla situazione dei ricevitori. Per quanto riguarda questi apparecchi, i problemi esistenti sono già di un'entità minore rispetto a quelli degli emettitori. Si può dire che, in questo momento, si trovano in una situazione più facile rispetto agli altri componenti per CO. Come esempio si può vedere la figura 8, nella quale la soluzione è costituita da un diodo pin a giunzione. È evidente che tale soluzione è molto più avanzata di quelle attualmente disponibili per gli emettitori.

Reti Locali (LAN)

Fino ad oggi le reti locali (LAN) hanno sempre funzionato a velocità medie, comprese fra 1 e 15 Mb/s, e su superfici geografiche di dimensioni piuttosto ristrette. Generalmente non coprivano distanze superiori al chilometro. Come requisito parallelo, benché fondamentale, presentavano una facile manutenzione ed una grande versatilità, che consentiva di modificarle secondo le diverse esigenze.

Attualmente la situazione sembra dover cambiare radicalmente. Secondo le previsioni, le velocità arriveranno ai Mb/s con lunghezze dei cavi di vari chilometri. Per questo, come è logico, l'unica soluzione che appare possibile è quella che si può sviluppare con le fibre ottiche. I problemi di velocità e di

lunghezza dei cavi non sarebbero tali, e le tecniche come la moltiplicazione per divisione di lunghezza d'onda (WDM) darebbero la possibilità di ampliare e modificare quando necessario l'architettura adottata.

Una serie di piccoli problemi ha complicato finora lo sviluppo rapido delle LAN ottiche. Il primo, e ovvio, riguarda il fatto che, poiché la loro configurazione comprende connessioni multiple, i componenti richiesti sono molto diversi da quelli impiegati nelle reti estese o punto-punto. Tali dispositivi iniziano ora ad apparire sul mercato a prezzi accessibili.

Il secondo problema deriva dal fatto che almeno le reti per la trasmissione di pacchetti di dati funzionano in modo asincrono, in contrasto col funzionamento sincrono dei collegamenti telefonici o a lunga distanza. Di conseguenza è necessario proteggere il sistema contro le sequenze di pacchetti di dati inviati oltre un certo tempo che, altrimenti, potrebbero rallentare gli interscambi in tempo reale, come la voce o i dati di controllo.

In terzo luogo, le reti richiedono protocolli di controllo dell'accesso che regolano l'entrata dei diversi utenti che condividono le risorse disponibili. Un'ultima complicazione deriva dal fatto che queste reti richiedono un elevato numero di punti di commutazione locale, che nelle reti estese vengono governati da sistemi elettronici altamente sofisticati e molto costosi. L'obiettivo delle nuove LAN consiste nel ridurre i costi e nel semplificare tali dispositivi di controllo.

La Tabella 2 mostra un certo numero di specifiche funzionali, secondo le necessità degli utenti normali delle LAN a fibre ottiche. Tutte queste caratteristiche saranno presenti nella prossima generazione di reti, grazie al loro funzionamento a commutazione di pacchetto, vale a dire con dispositivi che lavorano come commutatori di

circuiti originando canali logici dall'inizio alla fine.

D'altra parte, dato che le topologie da impiegare sono uguali a quelle utilizzate finora, cioè ad anello, a bus e a stella, si può già prevedere quali componenti ottici saranno necessari in ciascun caso. La Tabella 3 ne riporta una sintesi. Di tutti questi, senza dubbio il componente chiave è il connettore, che deve garantire la compatibilità meccanica tra i restanti componenti del sistema. I suoi requisiti normali sono circa 0,8-1,5 dB di perdite di inserimento ed un'alta stabilità di funzionamento con temperature ambiente variabili tra i -30 ed i +70°C.

Per ciò che concerne gli accoppiatori, è impossibile indicarne uno solo, dal momento che è necessario che si adattino a situazioni diverse. In generale i tipi principali sono due: quelli che non variano al variare della lunghezza d'onda e quelli che invece dipendono da essa. Senza entrare nei dettagli della loro tecnologia, possiamo dire che sul mercato esistono già, per la maggior parte, quelli necessari: da 1:1 a 1:10. Le perdite generalmente sono tra 1 e 2 dB e l'isolamento tra le guide è tra 15 e 40 dB nel caso di quelli direzionali. Per quelli del tipo a stella questi valori passano a $\pm 0,7$ a 4 dB e da 1 a 4 dB.

Nei WDM, che già utilizzano componenti più sofisticati comprendenti reti di diffrazione, prismi e filtri dicroici le perdite possono essere di 1 - 45 dB e gli accoppiamenti di 20 - 50 dB; le finestre di lunghezza d'onda vanno da 2 a 4. Per quanto riguarda i commutatori, generalmente si adottano due metodi, a fibra mobile e a specchio mobile. In entrambi i casi le perdite sono di 1,0 - 2,5 dB e l'isolamento tra le guide di 40 - 60 dB.